



**University of  
Zurich**<sup>UZH</sup>

**Zurich Open Repository and  
Archive**

University of Zurich  
University Library  
Strickhofstrasse 39  
CH-8057 Zurich  
[www.zora.uzh.ch](http://www.zora.uzh.ch)

---

Year: 2011

---

## **Bilaterales Training**

Luft, A R ; Campen, K

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-87519>

Book Section

Accepted Version

Originally published at:

Luft, A R; Campen, K (2011). Bilaterales Training. In: Nowak, D. Handfunktionsstörungen in der Neurologie. Heidelberg: Springer, 238-43.

# Bilaterales Training

Andreas R. Luft<sup>1,2</sup>, Katrin Campen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Klinische Neurorehabilitation, Neurologische Klinik, Universität Zürich und <sup>2</sup> Zentrum für ambulante Rehabilitation, Zürcher Höhenkliniken Wald/Clavadel, Zürich

---

## TRAILER START

Bilaterales Training bezeichnet das Training von symmetrischen Bewegungen mit beiden oberen Extremitäten. Diese können synchronisiert oder versetzt (gegenläufig) trainiert werden. Bilaterales Training nutzt andere neuronale Mechanismen auf Ebene der motorischen Cortices als unilaterales Training. Wirksam scheint bilaterales Training nur bei einigen Patienten zu sein. Über eine Kombination mit funktioneller elektrischer Stimulation oder Roboter-assistiertem Training könnte die Wirksamkeit verbessert werden. Weitere klinische und Grundlagenforschung ist notwendig, um das mögliche Potential bilateraler Therapien auszuschöpfen.

## TRAILER STOP

---

## Definition

Bilaterales Training bezeichnet das **gleichzeitige aktive Üben mit beiden Extremitäten**. Die Bewegungen müssen dabei nicht synchron ablaufen, sondern können auch gegenläufig durchgeführt werden. Wenn der Patient ausreichend Armfunktion besitzt, so sollten beide Extremitäten nicht mechanisch verbunden sein, sondern unabhängig voneinander bewegt werden.

Motorisches Training mit beiden Armen bei Patienten mit einer Hemiparese wird in der Physiotherapie schon lange angewendet. Ziel ist eine Erleichterung, Fazilitation, der paretischen Extremität durch Bewegen der nicht-paretischen Seite oder das Einbeziehen des besseren Armes in komplexe Bewegungsabläufe (REF).

Der moderne Ansatz repetitiver, bilateraler Übungstherapien ist **bewegungs- und neuro-wissenschaftlich motiviert**. Es entstanden eine Reihe von Verfahren und Geräten, deren Wirksamkeit in Fallserien oder kleinen randomisierten Studien überprüft wurde. In einer Cochrane Metaanalyse wurden diese Ergebnisse 2010 zusammengefasst (Coupar et al., 2010).

## Grundlagen

Während die Beine im täglichen Leben zum Gehen vorwiegend zusammen bewegt werden, ist die Benutzung der oberen Extremitäten meistens asymmetrisch. Greifen, Schreiben, eine Türe öffnen sind unilateral Bewegungen, die vorwiegend mit dem dominanten Arm durchgeführt werden. Daneben gibt es durchaus auch bilaterale Bewegungsmuster, z.B. Schwimmen und Schreiben auf einer Tastatur. Symmetrisch mitbewegt werden die Arme auch beim Gehen, eine Ausgleichsbewegung im Gesamtkonzept der Lokomotion (Dietz, 2002). Komplexe Aktivitäten, z.B. Autofahren, umfassen immer symmetrische und asymmetrische Armbewegungsmuster. **Die Koordination zwischen den oberen Extremitäten ist nach einem hemiparetischen Schlaganfall gestört und muss aufgaben-spezifisch trainiert werden.** Allein deshalb schon ist es naheliegend, bilaterales Training in ein Gesamttherapiekonzept zu integrieren.

Bilaterale Arm- und Handbewegungen unterliegen einem spezifischen neuronalen Kontrollmechanismus, der sich nicht einfach aus der Addition der Mechanismen unilateraler Bewegungen zusammensetzt. Der supplementärmotorische (SMA) und der primärmotorische Cortex (M1) enthal-

ten Neurone, die nur während bimanuellen Bewegungen feuern (Donchin et al., 1998; Kazennikov et al., 1999). Diese **spezifische Art der Ansteuerung** legt nahe, dass auch spezifisches, das heisst bilaterales Training notwendig ist, um bilaterale Bewegungen zu erlernen und zu rehabilitieren.

Wenn Affen eine neue Fingersequenz mit einer Hand lernen, verbessert sich – zumindest in der Frühphase des Lernens – auch die andere Hand im Ausführen dieser Sequenz (Rand et al., 2000). **Bilaterales Lernen durch unilaterales Üben** könnte auch bei der Hemiparese wirksam genutzt werden und ist ein Grund, die weniger betroffene Seite zumindest auch zu trainieren und auf einen Transfer zur kranken zu hoffen. Diese theoretische Hypothese wird durch einige physiologische und Verhaltensbefunde gestützt:

1. **Bilaterale Bewegungen führen zu einer Veränderung der aktivitätsbedingten intrakortikalen Erregbarkeit** (ICF, intracortical facilitation) und einer Abnahme intrakortikaler Inhibition (ICI). Im Gegensatz fasilitieren unilaterale Bewegungen nur die kontralaterale Hemisphäre. Die ipsilaterale wird gehemmt (erhöhte ICI) (McCombe Waller et al., 2008a).
2. **Bimanuelles Training verbessert die unimanuelle Funktion.** Während des bimanuellen Trainings erhöhte sich die Amplitude der frühen Komponente des *movement related potential* (MRP). Die Vergrößerung korrelierte mit der Verbesserung der unimanuellen Funktion. Diese Komponente reflektiert die Planungsphase einer Bewegung und könnte sich durch bimanuelles Training so verändert haben, dass eine Verbesserung der unimanuellen Armfunktion resultierte (Smith and Staines, 2006).
3. Rhythmisches bilaterales Armtraining (BATRAC) über 6 Wochen führte bei den meisten Patienten zu einer vermehrten **Rekrutierung des Prämotorkortex beider Hemisphären**. Patienten, die diese Rekrutierung zeigten, verbesserten die Armfunktion. Die restlichen zeigten keine Besserung (Luft et al., 2004).

Diese Arbeiten legen nahe, dass bilaterales Training plastische Veränderungen vorwiegend in bi-hemisphärischen Netzwerken induziert. Transcallosale Verbindungen spielen bei diesen Vorgängen vermutlich eine zentrale Rolle, jedoch sind die genauen Abläufe noch nicht verstanden. Aktivierung kontraläsionaler motorischer Cortices findet sich vor allem bei Patienten mit insuffizienter funktioneller Erholung, während Patienten mit guter Erholung den ipsiläsionalen Cortex zur Ansteuerung der paretischen Seite verwenden (Ward et al., 2003a, b). Es ist denkbar, dass kontraläsionale Aktivierung bei Patienten mit sehr ausgeprägten Defiziten eine positive Funktion einnimmt (Serrien et al., 2004; Ward et al., 2006).

---

#### WICHTIG

Zwei Tatsachen sprechen für bilaterales Training in der Rehabilitation: 1, bilaterale Bewegungen sind neuronal anders kontrolliert/verschaltet als unilaterale und erfordern deshalb spezifisches bilaterales Training. 2, neurophysiologische Befunde lassen vermuten, dass bilaterales Training positive Auswirkungen auf unilaterale Bewegungen haben kann.

#### WICHTIG – ENDE

---

## Praktische Anwendung

Bilaterale Elemente finden sich in verschiedene physiotherapeutischen Verfahren. Im Folgenden werden eigenständige (und als solche publizierte) bilaterale Methoden beschrieben.

---

## WICHTIG

Es lassen sich drei Arten von bilateralem Training unterscheiden (McCombe Waller and Whittall, 2008): Armbewegung mit fixierter Hand, bilaterales Training isolierter Gelenkbewegungen, bilaterales Training von funktionellen Bewegungsabläufen.

## WICHTIG – ENDE

---

### Armbewegungen mit fixierter Hand

Beim bilateralen Armtraining mit rhythmischer Stimulation (**BATRAC**, Abb. 1) drückt der Patient zwei auf Schienen bewegliche Griffe von sich weg und zieht diese zu sich hin (Whittall et al., 2000). Die Griffe sind nicht miteinander verbunden, d.h. die nicht-paretische Seite kann die paretische nicht unterstützen. Die **Bewegung findet in Schulter und Ellenbogen statt**. Der Rumpf sollte fixiert werden, um einer Unterstützung der paretischen Seite durch Vor- und Zurückneigen des Rumpfes entgegen zu wirken. Die paretische Hand wird, falls notwendig, am Griff mit einer Bandage fixiert. Der Patient bewegt die Griffe zu einem **Metronom**, dessen Frequenz je nach Bewegungsfähigkeit des Patienten eingestellt wird (üblicherweise 0.2-0.4 Hz). Die Bewegung findet **in Phase oder in Gegenphase** statt. Nach dem in Studien veröffentlichten Protokoll trainiert der Patient über 6 Wochen, dreimal pro Woche eine Stunde. Innerhalb dieser Stunde werden viermal 5 min BATRAC, abwechselnd phasisches oder gegenphasisches Training, mit 10 min Pause absolviert.

Ähnliche Bewegungen werden im *Mirror Image Movement Enabler* (**MIME**) trainiert (Lum et al., 2002). Hier **bewegt jedoch ein Roboter den paretischen Arm** (Hände fixiert in einer Schiene) spiegelbildlich zur nicht-paretischen Seite, die Armstreck- und Retraktionsbewegungen ausführt. Im veröffentlichten Trainingsprotokoll wurden die Patienten in 24 Sitzungen über 2 Monate trainiert. Eine Sitzung bestand aus 50 min Training nach 5-minütiger Einstellung und Positionierung.



**Abbildung 1.** BATRAC-Training.

---

Box

Bilaterale Armbewegungen mit fixierter Hand werden mit passiven (BATRAC) oder motorisierten Geräten durchgeführt. Geübt wird das Strecken und Beugen des Armes in Schulter und Ellenbogen als erster Schritt zum funktionellen Greifen. Der Einsatz des Roboters erlaubt auch das Training von Patienten mit schwerem Defizit. Vor allem ehemals rechts-händige Patienten mit links-hemisphärischen Läsionen profitieren von BATRAC.

Box – ENDE

---

### **Bilaterales Training isolierter Gelenkbewegungen**

Ein publiziertes Verfahren dieser Kategorie verwendet funktionelle Elektrostimulation der paretischen Hand, ausgelöst durch gleichseitige Muskelaktivität gemessen im Elektromyogramm (EMG), in Kombination mit Bewegungen der nicht-paretischen Hand (Cauraugh and Kim, 2002). Geübt werden bilaterale Extensions- und Flexionsbewegungen der Finger und des Handgelenks. Das publizierte Protokoll umfasst sechs Stunden Training aufgeteilt auf vier Sitzungen innerhalb von zwei Wochen. In einer Sitzung werden dreimal 30 Bewegungen geübt. Zwischen den Bewegungen werden 25 Sekunden Pause eingehalten.

Der Bi-Manu-Track Roboter trainiert Unterarmpronation und -supination sowie Handgelenk-Flexion und Dorsalextension (Hesse et al., 2005). Beide Hände greifen zylinderförmige Griffe. Falls notwendig, kann die paretische Hand am Griff mit einer Bandage fixiert werden. Roboter oder Patient bewegen beide Seiten synchron in einem von drei Modi, 1, beide Seiten passiv, 2, beide aktiv oder, 3, die paretische Seite passiv synchronisiert von der nicht-paretischen, die der Patient aktiv bewegt. Der Patient sitzt dabei vor dem Gerät und hat die Ellenbogen um 90° gebeugt. Das publizierte Trainingsprotokoll umfasst 30 Sitzungen verteilt auf sechs Wochen. In einer Sitzung werden 200 Pro-/Supination und 200 Handgelenksbewegungen geübt. Die Hälfte der Bewegungen wird im passiv-passiv Modus, die Hälfte im passiv-aktiv Modus ausgeführt. Wenn der Patient die paretische Seite bewegen kann, folgen zusätzlich 25-50 Bewegungen im aktiv-aktiv Modus.

Ein weiters publiziertes Verfahren ist die aktiv-passiv bilaterale Therapie (APBT) (Stinear and Byblow, 2004), eine reduzierte Version der Bi-Manu-Track Methode, die sich auf den aktiv-passiv Modus und die Handgelenkbewegung beschränkt. Im publizierten Protokoll trainierten die Patienten sechsmal pro Tag über vier Wochen. Ein Einzeltraining dauerte 10 min und bestand aus repetitiven Bewegungen in selbst-gewähltem Rhythmus (~1,2 Hz). Bilaterale Bewegungen waren entweder synchron oder um 200 Millisekunden versetzt.

---

Box

Verfahren zum isolierten Training einzelner Gelenksbewegungen kombinieren bilaterales Training mit funktioneller Elektrostimulation oder Trainingsrobotern wie dem Bi-Manu-Track. Auch Patienten mit schweren Defiziten können trainiert werden.

Box – ENDE

---

### **Bilaterales Training von funktionellen Bewegungsabläufen**

Mudie und Matyas berichten über ein bilaterales isokinetisches Training (BIT) genanntes Verfahren (Mudie and Matyas, 2000). Drei Bewegungen werden geübt, 1, einen Holzklotz auf ein Regal in Schulterhöhe legen, 2, aus einem Glas trinken (simuliert) und, 3, einen kleinen Holzzylinder vom Tisch aufheben und von unten in eine vorgesehene Bohrung an einem Regalbrett in Augenhöhe stecken. Diese Bewegungen werden entweder uni- oder bilateral ausgeführt. Das publizierte Protokoll besteht auf 40 Sitzungen über acht Wochen. In jeder Sitzung werden 10 Repetitionen der Bewegung geübt.

Andere Autoren verwenden Aufgaben-orientierte Bewegungen, die uni- und bilateral geübt werden (Desrosiers et al., 2005; Lewis and Byblow, 2004; Platz et al., 2001).

---

Box

Beim bilaterales Training funktioneller Bewegungsabläufe führt der Patient gleichförmige Bewegungen mit beiden Armen aus. Eine geringes Ausgangsdefizit ist dabei Voraussetzung.

Box – ENDE

---

---

EXKURS

### Evidenz für Wirksamkeit

Eine Cochrane Analyse von 14 Studien (421 Teilnehmer) mit unterschiedlichen bilateralen Trainingsverfahren stellt im Vergleich zu „usual care“ oder unilateralen spezifischen Trainingsverfahren keine signifikanten Effekte auf Aktivitäten des täglichen Lebens, Arm- oder Handfunktion und Behinderungsmasse fest (Coupar et al., 2010). Die Autoren kommen aber, wie so oft in Cochrane-Analysen über rehabilitative Verfahren, zu dem Schluss, dass **die Evidenz für oder gegen eine Wirksamkeit ungenügend** ist, um eine abschliessende Schlussfolgerung zuzulassen. Im folgenden werden Studien zu den oben beschriebenen Verfahren zusammengefasst.

#### Armbewegungen mit fixierter Hand

BATRAC wurde in zwei randomisierten Studien an Patienten sechs oder mehr Monate nach einem ischämischen Schlaganfall untersucht. Bei 21 Patienten mit leichter bis mittelgradiger Hemiparese wurde BATRAC mit konventioneller Physiotherapie verglichen, die aus einem definierten Programm von Übungen nach Bobath-Prinzipien, in der Dauer des Training dem BATRAC Training angepasst, bestand (Luft et al., 2004). Für die Verbesserung der Armbehinderung (Fugl-Meyer-Skala) als primärem Endpunkt war BATRAC effektiver als Standardtherapie, wenn die drei Patienten von der Analyse ausgeschlossen wurden, die keine bilaterale prämotorische Aktivierung nach dem Training in der funktionellen Kernspintomographie zeigten. In der Folgestudie an 111 Patienten (55 BATRAC, 56 Standardtherapie) sechs oder mehr Monate nach einem ersten ischämischen Insult zeigten sich vergleichbare Verbesserungen in Fugl-Meyer-Score und Wolf-Armfunktionstest zwischen beiden Interventionen. Die Verbesserungen waren in einer Kontrolluntersuchung 3 Monate nach Ende des Trainings noch nachweisbar. Subjektiv waren die Patienten, die nicht wussten, welches die experimentelle und welches die Kontrollintervention war, zufriedener nach BATRAC als nach Standardtherapie. Beide Studien zeigten, dass **bilaterales Training bei manchen, aber nicht bei allen Patienten wirkte**. McCombe-Waller konnte zeigen, dass Patienten mit **linkshemisphärischen Läsionen** (rechts-händige Patienten, motorisch dominante Hemisphäre) **besser auf die Therapie ansprechen**, als Patienten mit rechtshemisphärischen Läsionen (McCombe Waller and Whittall, 2005). Zudem muss man berücksichtigen, dass unilaterale Tests als Endpunkt die Effekte des bilateralen Trainings wahrscheinlich ungenügend abbilden. Entsprechend der oben diskutierten Rationale für bilaterales Training – dass bilaterale Bewegungen auch ein spezifisches bilaterales Training benötigen und sich nicht durch unilaterales Üben bessern – sind Tests der bilateralen Koordination bessere Endpunkte. So konnte auch eine deutliche Verbesserung der Koordination nach BATRAC gezeigt werden (McCombe Waller et al., 2008b).

MIME Training wurde in 27 Patienten mit moderater Parese mit Standardtherapie nach Bobath-Prinzipien verglichen (Lum et al., 2002). **MIME trainierte Patienten zeigten grössere Verbesserung im Fugl-Meyer-Score** nach 1 und 2 Monaten Training. Zum Zeitpunkt des Kontrolluntersuchung nach 6 Monaten waren die MIME Patienten zwar immer noch besser als die Kontrollen, der

Unterschied jedoch nicht mehr signifikant. Die Bewegungsradius beim funktionellen Greifen war bei MIME Patienten nach 2 Monaten Training ebenfalls signifikant besser als in der Kontrollgruppe.

### **Bilaterales Training isolierter Gelenkbewegungen**

Bilaterales Training mit funktioneller Elektrostimulation (FES) wurde an 25 Patienten mit leichter Parese und chronischer Behinderung nach Schlaganfall untersucht (Cauraugh and Kim, 2002). Verglichen wurde bilaterales (EMG-ausgelöste FES der paretischen verbunden mit aktiver Bewegung der nicht-paretischen Hand) mit unilateralem Training und ein Kontrollgruppe, die unilaterales Training ohne FES absolvierte. Im Box-and-Blocks Test, bei dem die Probanden Holzklötze von einer Box in eine andere transferieren mussten, **verbesserten sich die bilateral trainierten Patienten mehr als unilateral trainierte oder Kontrollen**. Zudem verbesserte sich die Reaktionszeit und die Fähigkeit zum Aufrechterhalten einer Kontraktion an der paretischen Seite und war nach dem bilateralen Training so gut wie die der nicht-paretischen Hand. Auch die unilateral trainierten Patienten besserten sich deutlicher als die Patienten der Kontrollgruppe.

Das Bi-Manu-Track Verfahren wurde an 44 Patienten mit schwerer Parese ca 5 Wochen nach einem ischämischen oder hämorrhagischen Schlaganfall untersucht (Hesse et al., 2005). Die Autoren verglichen das bimanuelle Verfahren mit EMG-ausgelöster funktioneller Elektrostimulation. Behinderung (Fugl-Meyer-Score) und Armfunktion (Medical Research Council Arm Score) **verbesserten sich in beiden Gruppen, jedoch signifikant mehr in der Bi-Manu-Track Gruppe**. Die Ergebnisse könnten Folge der Bilateralität der Verfahrens sein. Allerdings war die Zahl der Repetitionen in Bi-Manu-Track Therapie zehnmal höher als in der Kontrollgruppe, was ebenfalls die bessere Wirksamkeit erklären könnte.

Zur APBT-Methode existiert keine kontrollierte Studie. In einer Kohortenstudie zeigte es eine Verbesserung im Fugl-Meyer-Score in 5 von 9 Patienten. Zwei dieser Patienten wurden 2 Monate nach dem Schlaganfall trainiert, so dass eine Verbesserung durch spontane Erholung nicht auszuschliessen ist (Stinear and Byblow, 2004).

### **Bilaterales Training von funktionellen Bewegungsabläufen**

Bilaterales Training von gezielten Greifbewegungen wurde in einer Serie von 12 Patienten mit mildem Defizit 10 Wochen nach dem Schlaganfall untersucht (Mudie and Matyas, 2000). **Nur nach bilateralem, nicht nach unilateralem Training verbesserte sich die Kinematik von Streck- und Greifbewegungen mit dem paretischen Arm**. In einer randomisierten kontrollierten Studie an 12 chronischen Patienten mit leichtem Defizit war bilaterales Training effizienter als unilaterales (Summers et al., 2007). Die Wirksamkeit wurde gemessen mit Hilfe des Modified Motor Assessment Scales (MAS) und eine kinematischen Analyse.

Desrosiers und Kollegen randomisierten 41 Patienten in der subakuten Phase nach einem Schlaganfall (Desrosiers et al., 2005). Zwanzig Patienten wurden zusätzlich zu konventioneller Physiotherapie in bi- und unilateralen Bewegungen trainiert. Die Kontrollgruppe erhielt zusätzliche Standardtherapie. **Nach 15-20 zusätzlichen Sitzungen konnte kein Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden**.

EXKURS – ENDE

---

## **Schlussfolgerungen**

In Bezug auf die Wirksamkeit hat bilaterales Training die anfänglichen Erwartungen enttäuscht und sich nicht als überlegene Therapiemethode für alle Patienten herausgestellt. Auch wenn einige kleine randomisierte Studien einen eine höhere Wirksamkeit im Vergleich zu Kontrolle zeigen, so ist die **Mehrzahl der Studien und Metaanalysen negativ**. Entscheidend ist immer die Wahl der Kontrolltherapie. Wenn diese, wie in den meisten Rehabilitationszentren Standard, aktive Bewegungen umfasst, so ist sie oft gleich effektiv wie bilaterales Training.

Man muss allerdings die Effekt, vor allem die neurophysiologischen Auswirkungen bilateralen Trainings genauer betrachten. Bei einigen Patienten zeigt bilaterale Therapie eine überlegene Wirksamkeit (Luft et al., 2004). Wir wissen noch nicht, über welche genauen Mechanismen bilaterales Training funktioniert. Wahrscheinlich ist diese **Trainingsform für bestimmte Patienten mit bestimmten Läsionsmustern, Defizitprofilen und Rehabilitationszielen optimal** und sollte in ein Gesamtprogramm der Rehabilitation aufgenommen werden. Es könnte auch sein, dass sich die positiven Wirkungen des bilateralen Trainings erst über eine **Kombination mit anderen Verfahren**, z.B. der funktionellen Elektrostimulation (Cauraugh and Kim, 2002) oder dem Roboter-assistierten Training (Hesse et al., 2005) auslösen lassen.

Deshalb ist weitere Forschung, sowohl an den klinischen Effekten wie an den grundlegenden Mechanismen notwendig. Nur diese Forschung kann zeigen, ob spezielles bilaterales Training ein Instrument im Repertoire der motorischen Rehabilitation werden kann.



## Bibliografie

- Cauraugh, J.H., Kim, S., 2002. Two coupled motor recovery protocols are better than one: electromyogram-triggered neuromuscular stimulation and bilateral movements. *Stroke* 33, 1589-1594.
- Coupar, F., Pollock, A., van Wijck, F., Morris, J., Langhorne, P., 2010. Simultaneous bilateral training for improving arm function after stroke. *Cochrane Database Syst Rev* 4, CD006432.
- Desrosiers, J., Bourbonnais, D., Corriveau, H., Gosselin, S., Bravo, G., 2005. Effectiveness of unilateral and symmetrical bilateral task training for arm during the subacute phase after stroke: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil* 19, 581-593.
- Dietz, V., 2002. Do human bipeds use quadrupedal coordination? *Trends Neurosci* 25, 462-467.
- Donchin, O., Gribova, A., Steinberg, O., Bergman, H., Vaadia, E., 1998. Primary motor cortex is involved in bimanual coordination. *Nature* 395, 274-278.
- Hesse, S., Werner, C., Pohl, M., Rueckriem, S., Mehrholz, J., Lingnau, M.L., 2005. Computerized arm training improves the motor control of the severely affected arm after stroke: a single-blinded randomized trial in two centers. *Stroke* 36, 1960-1966.
- Kazennikov, O., Hyland, B., Corboz, M., Babalian, A., Rouiller, E.M., Wiesendanger, M., 1999. Neural activity of supplementary and primary motor areas in monkeys and its relation to bimanual and unimanual movement sequences. *Neuroscience* 89, 661-674.
- Lewis, G.N., Byblow, W.D., 2004. Neurophysiological and behavioural adaptations to a bilateral training intervention in individuals following stroke. *Clin Rehabil* 18, 48-59.
- Luft, A.R., McCombe-Waller, S., Whitall, J., Forrester, L.W., Macko, R., Sorkin, J.D., Schulz, J.B., Goldberg, A.P., Hanley, D.F., 2004. Repetitive bilateral arm training and motor cortex activation in chronic stroke: a randomized controlled trial. *Jama* 292, 1853-1861.
- Lum, P.S., Burgar, C.G., Shor, P.C., Majmundar, M., Van der Loos, M., 2002. Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 83, 952-959.
- McCombe Waller, S., Forrester, L., Villagra, F., Whitall, J., 2008a. Intracortical inhibition and facilitation with unilateral dominant, unilateral nondominant and bilateral movement tasks in left- and right-handed adults. *J Neurol Sci* 269, 96-104.
- McCombe Waller, S., Liu, W., Whitall, J., 2008b. Temporal and spatial control following bilateral versus unilateral training. *Hum Mov Sci* 27, 749-758.
- McCombe Waller, S., Whitall, J., 2005. Hand dominance and side of stroke affect rehabilitation in chronic stroke. *Clin Rehabil* 19, 544-551.
- McCombe Waller, S., Whitall, J., 2008. Bilateral arm training: why and who benefits? *NeuroRehabilitation* 23, 29-41.
- Mudie, M.H., Matyas, T.A., 2000. Can simultaneous bilateral movement involve the undamaged hemisphere in reconstruction of neural networks damaged by stroke? *Disabil Rehabil* 22, 23-37.
- Platz, T., Bock, S., Prass, K., 2001. Reduced skilfulness of arm motor behaviour among motor stroke patients with good clinical recovery: does it indicate reduced automaticity? Can it be improved by unilateral or bilateral training? A kinematic motion analysis study. *Neuropsychologia* 39, 687-698.

- Rand, M.K., Hikosaka, O., Miyachi, S., Lu, X., Nakamura, K., Kitaguchi, K., Shimo, Y., 2000. Characteristics of sequential movements during early learning period in monkeys. *Exp Brain Res* 131, 293-304.
- Serrien, D.J., Strens, L.H., Cassidy, M.J., Thompson, A.J., Brown, P., 2004. Functional significance of the ipsilateral hemisphere during movement of the affected hand after stroke. *Exp Neurol* 190, 425-432.
- Smith, A.L., Staines, W.R., 2006. Cortical adaptations and motor performance improvements associated with short-term bimanual training. *Brain Res* 1071, 165-174.
- Stinear, J.W., Byblow, W.D., 2004. Rhythmic bilateral movement training modulates corticomotor excitability and enhances upper limb motricity poststroke: a pilot study. *J Clin Neurophysiol* 21, 124-131.
- Summers, J.J., Kagerer, F.A., Garry, M.I., Hiraga, C.Y., Loftus, A., Cauraugh, J.H., 2007. Bilateral and unilateral movement training on upper limb function in chronic stroke patients: A TMS study. *J Neurol Sci* 252, 76-82.
- Ward, N.S., Brown, M.M., Thompson, A.J., Frackowiak, R.S., 2003a. Neural correlates of motor recovery after stroke: a longitudinal fMRI study. *Brain* 126, 2476-2496.
- Ward, N.S., Brown, M.M., Thompson, A.J., Frackowiak, R.S., 2003b. Neural correlates of outcome after stroke: a cross-sectional fMRI study. *Brain* 126, 1430-1448.
- Ward, N.S., Newton, J.M., Swayne, O.B., Lee, L., Thompson, A.J., Greenwood, R.J., Rothwell, J.C., Frackowiak, R.S., 2006. Motor system activation after subcortical stroke depends on corticospinal system integrity. *Brain* 129, 809-819.
- Whitall, J., McCombe, W.S., Silver, K.H., Macko, R.F., 2000. Repetitive bilateral arm training with rhythmic auditory cueing improves motor function in chronic hemiparetic stroke. *Stroke* 31, 2390-2395.